

Научная статья  
УДК 519.242+ 519.876.5  
doi: 10.34987/vestnik.sibpsa.2024.46.68.012

## Алгоритм интеллектуальной поддержки принятия организационно-проектных решений по управлению эффективностью эвакуации из учреждений клубного типа

*Анастасия Алексеевна Джафарова*<sup>1</sup>  
*Александр Владимирович Матвеев*<sup>2</sup>

*Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия,*

<sup>1</sup> <https://orcid.org/0000-0001-7878-9193>

<sup>2</sup> <https://orcid.org/0000-0002-0778-3218>

*Автор ответственный за переписку: Анастасия Алексеевна Джафарова,  
nastyas300696@mail.ru*

**Аннотация.** Эвакуация людей при пожарах в учреждениях клубного типа осложняется многими факторами: высокая плотность людей, сложная геометрия помещений, низкая осведомленность посетителей с планировкой, плохое освещение, шумная обстановка, особенности поведения посетителей, употребляющих алкоголь и др. Эти факторы должны учитываться при разработке стратегии обеспечения безопасности людей при пожарах, что будет определять организационно-проектные решения.

В статье представлена методика и реализующий ее алгоритм интеллектуальной поддержки принятия организационно-проектных решений по управлению эффективностью эвакуации из учреждений клубного типа. Поддержка принятия решений обеспечивается применением технологий BIM-моделирования, аппарата байесовских сетей, имитационного моделирования, моделирования динамики развития пожара, а также теории планирования экспериментов. Принятие решение основано на построенной многомерной линейной модели зависимости времени эвакуации от трех влияющих факторов, управляя которыми можно формировать соответствующие организационно-проектные решения по обеспечению требуемого времени эвакуации.

Предлагаемый подход не ограничивается возможностью применения исключительно для учреждений клубного типа, при определенной адаптации может использоваться и для других объектов с массовым пребыванием людей.

**Ключевые слова:** эвакуация, ночной клуб, имитационное моделирование, байесовские сети, полный факторный эксперимент, время эвакуации, поддержка принятия решений.

**Для цитирования:** Джафарова А.А., Матвеев А.В. Алгоритм интеллектуальной поддержки принятия организационно-проектных решений по управлению эффективностью эвакуации из учреждений клубного типа // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2024. № 1 (32). С. 107-120. <https://doi.org/10.34987/vestnik.sibpsa.2024.46.68.012>.

Original article.

## Algorithm of intellectual support of organisational and design decisions on evacuation efficiency management from club-type institutions

Anastasiya A. Dzhafarova<sup>1</sup>  
Alexander V. Matveev<sup>2</sup>

Saint - Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia

<sup>1</sup> <https://orcid.org/0000-0001-7878-9193>

<sup>2</sup> <https://orcid.org/0000-0002-0778-3218>

**Corresponding author:** Anastasiya A. Dzhafarova, [nastyia300696@mail.ru](mailto:nastyia300696@mail.ru)

**Abstract.** Evacuation of people in case of fires in club-type institutions is complicated by many factors: high density of people, complex geometry of premises, low awareness of visitors with the layout, poor lighting, noisy environment, peculiarities of behaviour of visitors who consume alcohol, etc. These factors should be taken into account when developing a strategy to ensure the safety of people in fires, which will determine the organisational and design solutions.

The article presents a methodology and its algorithm of intellectual support of organisational and design decisions on evacuation efficiency management in club-type institutions. Decision making support is provided by applying BIM modelling technologies, Bayesian networks apparatus, simulation modelling, fire dynamics modelling, as well as the theory of planning experiments. Decision making is based on the constructed multidimensional linear model of evacuation time dependence on three influencing factors, controlling which it is possible to form appropriate organisational and design solutions to ensure the required evacuation time.

The proposed approach is not limited to the possibility of application exclusively for club-type institutions, with some adaptation it can be used for other objects with mass stay of people.

**Keywords:** evacuation, nightclub, simulation modelling, Bayesian networks, full factor experiment, evacuation time, decision support.

**For citation:** Dzhafarova A.A., Matveev A.V. Algorithm of intellectual support of organisational and design decisions on evacuation efficiency management from club-type institutions // Siberian Fire and Rescue Bulletin. 2024. № 1 (32): P 107-120. <https://doi.org/10.34987/10.34987/vestnik.sibpsa.2024.46.68.012>

### Введение

Пожары в учреждениях клубного типа часто приводят к катастрофическим последствиям, поскольку они обычно возникают во время мероприятий, на которых собирается много людей в ограниченном пространстве.

Как показывает анализ наиболее крупных пожаров, в большинстве случаев неадекватное поведение людей, приводящее к давке, в большей степени способствует увеличению количества погибших и травмированных, чем воздействие опасных факторов пожара [1].

Безусловно, во многих странах существуют определенные строительные нормы и правила для осуществления эвакуации из объектов данной категории, но многие нормы оказываются эффективными «только на бумаге». Произошедшие пожары в ночных клубах свидетельствуют о том, что открытыми остаются вопросы, являются ли эти нормы достаточно адекватными для обеспечения гарантированной безопасности людей во время эвакуации?

Результаты исследования причин и последствий пожара в ночном клубе Kiss в 2013 году в Бразилии, в котором погибло в общей сложности 242 человека, с использованием данных, взятых из отчетов, новостей и видео о пожаре, а также результатов лабораторных испытаний, специально проведенных в исследовании [2] показали, что если бы существовали дополнительные запасные выходы, и были изменены некоторые проектные решения, то вероятно, число жертв не было бы таким значительным.

Аналогичные результаты были получены при анализе пожара, произошедшего в декабре 2004 года в Буэнос-Айресе (Аргентина) в ночном клубе Republic. Запасные выходы были закрыты, что привело к гибели 194 человек и травмированию 1432 человек [3].

В 2003 году в ночном клубе The Station в Род-Айленде (США), произошел крупный пожар, в котором погибло 100 человек, еще более 200 человек получили ожоги, респираторные

заболевания и физические травмы [4]. На момент пожара в клубе находилось 439 человек. Исследование [4] показало, что если бы остальные посетители клуба не покинули здание в течение 3 минут, то и у них не было бы шансов выжить. Также результаты исследования показали, что, что скорость реакции посетителей клуба была важнейшим фактором для спасения на данном пожаре, задержка буквально в несколько секунд в значительной степени снижала вероятность выжить.

Наиболее резонансным в нашей стране стал пожар в клубе «Хромая лошадь» (г. Пермь) в декабре 2009 года. Из всего 156 погибших человек, 111 человек погибло непосредственно в ходе самого пожара, причем около половины – в узком коридоре и в дверях основного выхода. При этом, количество людей, находившихся в этот день в клубе, значительно превосходило положенное количество, на которое было рассчитано данное заведение, а посетители не знали о наличии запасного выхода [5, 6].

Данные примеры лишней раз свидетельствует о том, что наибольшую социально-экономическую проблему представляют крупномасштабные пожары в общественных зданиях, сопровождающиеся массовой гибелью людей, в особенности в учреждениях клубного типа. Вопросы обеспечения своевременной и безопасной эвакуации в случае пожаров или чрезвычайных ситуаций из данных объектов требуют пристального внимания.

Принятие научно-обоснованных организационно-проектных решений по управлению эффективностью эвакуации является чрезвычайно важным аспектом в вопросах обеспечения безопасности людей в учреждениях клубного типа при пожарах или чрезвычайных ситуациях, снижения возможного социального ущерба.

Данная статья посвящена разработке методики и реализующего ее алгоритма интеллектуальной поддержки принятия организационно-проектных решений по управлению эффективностью эвакуации.

### **Методы исследования**

Решение поставленной в статье задачи разработки алгоритма обеспечивается применением технологий BIM-моделирования, аппарата байесовских сетей, имитационного моделирования, моделирования динамики развития пожара, а также теории планирования экспериментов для идентификации модели.

#### **1. BIM-моделирование учреждения клубного типа**

При построении модели управления эффективностью эвакуации из учреждений клубного типа исходными данными являются их архитектура и объемно-планировочные решения. Это предполагает построение информационной модели учреждения, учитывающей данные решения. Для этого предлагается технология BIM-моделирования (от английского Building Information Modelin). Данная технология может применяться на всех этапах жизненного цикла зданий или сооружений, но в первую очередь, на этапе принятия конкретных проектных решений.

Использование BIM-моделирования на этапах проектирования объектов с массовым пребыванием людей уже давно нашло широкое применение в области пожарной безопасности [7, 8]. Применение современных программных средств, реализующих технологии BIM-моделирования, например Revit Autodesk, позволяет осуществить взаимодействие с другими средствами, решающими задачи моделирования эвакуации или моделирования пожаров.

Полевой метод математического моделирования распространения опасных факторов пожара

Для оценки распространения опасных факторов пожара (ОФП) и определения времени блокирования путей эвакуации в данной работе применяется полевой метод. Полевой метод основан на численном моделировании тепло- и массообмена в помещении, что позволяет учитывать все физические и химические процессы, происходящие во время пожара. Использование данного метода позволяет описывать пожары в помещениях со сложной геометрией, учитывать широкий спектр физических явлений. Полевой метод является более

сложным и ресурсоемким, чем другие методы моделирования распространения ОФП, однако он обеспечивает более точные результаты и позволяет учитывать все особенности конкретного помещения [9, 10]. Бурное развитие средств вычислительной техники привело к широкому использованию полевой модели для прогнозирования распространения пожаров, в особенности для больших помещений.

Результаты использования полевого метода для оценки распространения ОФП на примере конкретного ночного клуба подробно описаны в предыдущих исследованиях автора и изложены в работе [11]. Данные результаты позволили оценить доступное (требуемое) время эвакуации при пожаре на исследуемом объекте, что может являться критерием при оценивании эффективности эвакуации.

## 2. Аппарат байесовских сетей

Выбор, если не оптимальных, то хотя бы рациональных решений по управлению эффективностью эвакуации является сложной задачей не только потому, что существуют различные альтернативные варианты, но и по причине наличия достаточного большого количества разнородных факторов, оказывающих влияние на процесс эвакуации. При чем, многие из факторов вносят высокую степень неопределенности в исследуемый процесс. Выявление критических факторов, оказывающих наибольшее влияние на процесс эвакуации, предложено определять с использованием аппарата байесовских сетей. Байесовские сети являются достаточно полезным инструментом при решении данной задачи, поскольку они позволяют интегрировать различные типы знаний, логики и правил в системном виде, когда зависимости между переменными представляются в виде условных распределений вероятностей, явно учитывающих неопределенность в анализируемой системе. Данный подход строится на построении графической модели сети, формирующей разложение сложной системы на простые элементы. Построение графической модели байесовской сети позволяет строить модели процессов с множеством взаимодействующих факторов, в число которых могут входить, как управляемые переменные, находящиеся под контролем лиц, принимающих решения, так и переменные среды, а также некоторые промежуточные переменные, которые связывают управляемые и целевые переменные, отражающие показатели эффективности. Исследование построенной структуры может помочь выявить наиболее существенные управляемые переменные, для того, чтобы в дальнейшем обосновать принятие соответствующих управленческих решений [12]. Данный подход служит для проведения анализа по сценарию «что, если» при прогностическом моделировании, может совмещать как статистические закономерности, так и знания экспертов, полученные фактическим путем.

Когда структура сети определяется экспертами, она обычно направлена на имитацию известных причинно-следственных связей в моделируемой системе. Этот причинно-следственный подход позволяет оценить каскадные эффекты в системе и потенциальные факторы, которые могут влиять на выходные показатели системы.

В работе [13] ранее была построена модель эвакуации при пожаре в ночном клубе на основе байесовской сети, в которой в рассматриваемом контексте узлами выступали факторы, влияющие на процесс эвакуации при пожаре в ночном клубе. В качестве таких факторов рассматривались: вместимость здания ночного клуба, исправность пожарной автоматики, загруженность путей эвакуации, проектные решения, физическое состояние людей, наличие паники и так далее. Исследование данной модели позволило выявить факторы, оказывающие наиболее существенное влияние на время эвакуации при пожарах из учреждений клубного типа, а именно: количество выходов из здания ночного клуба, ширина дверных проемов выходов, количество посетителей. Все данные факторы относятся к категории управляемых параметров модели, что позволяет далее сформировать модель управления эффективностью эвакуации.

## 3. Имитационное моделирование

Для определения фактического времени эвакуации людей, как основного параметра ее эффективности, используются методы имитационного моделирования, реализованные в программном обеспечении Anylogic. Имитационное моделирование, как правило, применяется в

тех случаях, когда эксперименты с реальными объектами чрезвычайно дороги или невозможны, в том числе в виду опасности для здоровья и жизни людей [14].

При построении модели эвакуации использован агентно-ориентированный подход, позволяющий исследовать систему в целом на основе индивидуального поведения децентрализованных агентов [15], что позволяет учесть контингент посетителей ночных клубов. Применение имитационной модели эвакуации позволяет, варьируя исходные данные модели, отражающие те или иные влияющие управляемые факторы, оценивать при этом эффективность эвакуации. Имитационная модель эвакуации из ночного клуба с использованием агентно-ориентированного подхода, разработанная ранее авторами, представлена в статье [16].

#### 4. Теория планирования экспериментов

При построении многофакторной математической модели управления эффективностью эвакуации из учреждений клубного типа используются методы идентификации, суть которых заключается в нахождении оптимальной в некотором смысле модели, построенной по результатам наблюдений над входными и выходными переменными объекта [17, 18]. В качестве объекта исследования здесь выступает созданная ранее имитационная модель эвакуации. Теория планирования экспериментов позволяет оптимизировать организацию экспериментирования при исследовании объектов.

### Результаты исследования и их обсуждение

Общая схема методики интеллектуальной поддержки принятия организационно-проектных решений по управлению эффективностью эвакуации из учреждений клубного типа представлена на Рис. 1.

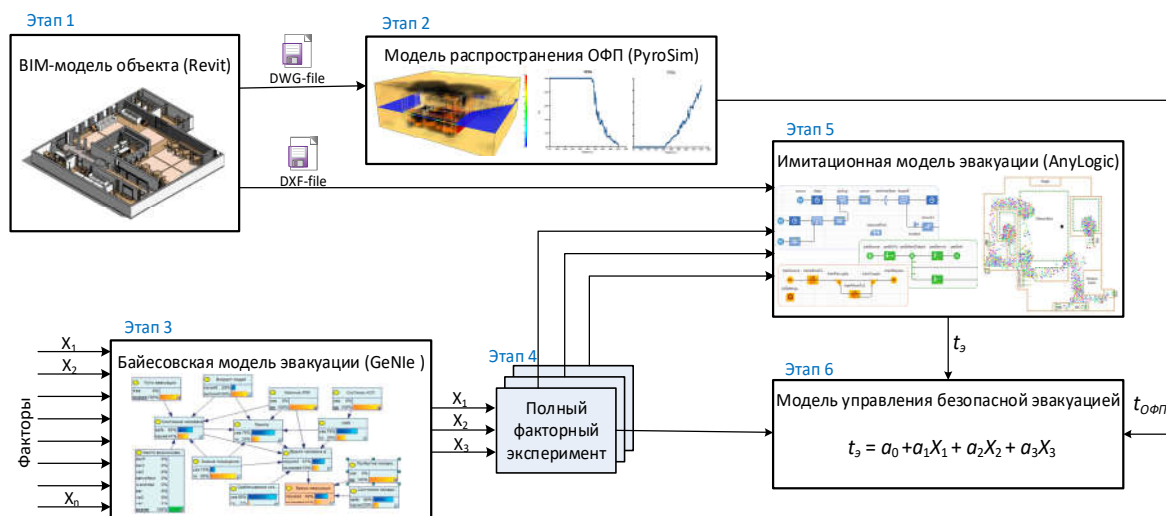


Рис. 1. Общая схема методики идентификации модели управления эффективностью эвакуации

Предлагаемая методика определяет последовательность шагов от постановки задачи по обоснованию организационно-проектных решений, направленных на обеспечение требуемого времени эвакуации из учреждения клубного типа и нормативного значения величины пожарного риска до идентификации модели управления эффективностью эвакуации и выработке на основе нее соответствующих вариантов решений. Методика состоит из следующих этапов:

*Этап 1.* Построение BIM-модели объекта.

Результаты построения BIM-модели являются исходными данными для построения модели распространения ОФП и построения имитационной модели эвакуации.

*Этап 2.* Построение модели распространения ОФП.

Результатом является оценка времени блокирования эвакуационных путей опасными факторами пожара, т.е. доступного времени для эвакуации посетителей ночного клуба.

*Этап 3.* Построение байесовской модели эвакуации.

Исходными данными является множество факторов неопределенности, оказывающих влияние на эффективность (время) эвакуации и связь между ними.

Результатом является совокупность факторов, оказывающих наиболее существенное влияние на время эвакуации при пожарах из учреждений клубного типа.

Интеллектуализацию методики обеспечивает именно использование байесовской сети, являющейся одним из представлений баз знаний с неопределенностью, применение которых нашло широкое применение и в машинном обучении [19, 20].

*Этап 4.* Планирование экспериментов с имитационной моделью эвакуации.

Далее требуется идентифицировать модель управления эффективностью эвакуации, т.е. выявить зависимости показателя эффективности (времени эвакуации) на изменения входных управляемых параметров, выявленных на этапе 3, при воздействии других случайных факторов. Таким образом, варьируя значения входных управляемых параметров, проводится серия экспериментов, на основе которых проводится оценка их влияния на эффективность эвакуации.

На данном этапе проводится полный факторный эксперимент, в котором реализуются все возможные комбинации факторов на всех выбранных для исследования уровнях. Результатом этапа является матрица полного факторного эксперимента для построения многомерной линейной модели.

*Этап 5.* Построение имитационной модели эвакуации из ночного клуба и проведение с ней экспериментов.

Результатом является имитационная модель, используемая далее в качестве объекта, предназначенного для проведения экспериментов при обосновании организационно-проектных решений по управлению эффективностью эвакуации.

*Этап 6.* Построение модели управления эффективностью эвакуации.

На данном этапе проводится непосредственно идентификация модели по результатам проведенных экспериментов с построенной ранее имитационной моделью эвакуации, реализующей агентно-ориентированный подход и учитывающей особенности контингента посетителей исследуемого объекта. Проводится статистическая обработка результатов экспериментов, определяется подходящая структура многофакторной модели, значения ее параметров, а также осуществляется проверка ее адекватности.

*Этап 7.* Формирование организационно-проектных решений.

Рассмотрим процессы, реализуемые на каждом из этапов, более подробно.

*На первом этапе* необходимо разработать BIM-модель исследуемого объекта, что можно сделать с использованием программного обеспечения Autodesk Revit, которое широко используется в исследованиях, связанных со строительством и проектированием зданий. Revit позволяет не только отобразить с высокой точностью архитектуру исследуемого объекта, но и учесть материалы отделки здания и их свойства, что необходимо при дальнейшей оценке уровня безопасности в рассматриваемом объекте.

Помимо этого, Revit совместим с различными программными средствами моделирования и позволяет импортировать и экспортировать общие форматы файлов. В предлагаемой методике BIM-модель исследуемого объекта экспортируется в виде DWG и DXF файлов в Pyrosim и Anylogic соответственно.

*На втором этапе* производится расчет доступного (требуемого) времени эвакуации с использованием полевого метода путем моделирования распространения ОФП в программном обеспечении Pyrosim.

Детальное применение данного метода представлено в методических рекомендациях ВНИИПО МЧС России [10]. Его использование позволяет определить динамику температуры, скорости, концентрации компонентов смеси и т.д. в каждой точке исследуемого помещения и определить моменты наступления критических значений ОФП.

Для исследования полевой модели Fire Dynamic Simulation (FDS) в программе Pyrosim задается сценарий пожара в рассматриваемом объекте. После экспорта BIM-модели клуба из Revit в Pyrosim задается очаг пожара и датчики ОФП, рассчитывается время распространения

ОФП и определяется время блокирования эвакуационных путей. Для определения доступного времени эвакуации необходимо наименьшее время достижения предельных значений ОФП умножить на коэффициент безопасности 0,8 в соответствии с нормативными требованиями методики, утвержденной приказом МЧС России [21].

На третьем этапе с использованием аппарата байесовских сетей определяются критические факторы, оказывающие наибольшее влияние на процесс эвакуации. Учитываются такие факторы как состояние путей эвакуации, место пожара, количество выходов из здания, их ширина, паника и другие. Определяются априорные и условные вероятности для всей сети, опираясь на статистику, информацию из открытых источников и экспертные оценки.

Исследование модели байесовской сети в программном обеспечении GeNIe позволяет выявить наиболее существенные факторы, влияющие на эффективность (время) эвакуации в исследуемом объекте.

На четвертом этапе, когда определены важнейшие факторы, оказывающие влияние на процесс эвакуации, строится матрица планирования для проведения полного факторного эксперимента. Для этого необходимо определить верхний и нижний уровни рассматриваемых факторов  $X$ , привести факторы к одному масштабу путем нормировки переменных:

$$Z_i = \frac{X_i - X_i^0}{\lambda_i}, \quad (1)$$

где  $X_i^0$  – центр плана,  $\lambda_i$  – интервал варьирования, которые определяют с помощью соотношений

$$X_i^0 = \frac{X_i^+ + X_i^-}{2},$$
$$\lambda_i = \frac{X_i^+ - X_i^-}{2}.$$

При нормировке все переменные принимают значения от -1 до +1, то есть  $Z_i \in [-1; +1], i = \overline{1, k}$ .

После чего составляется план эксперимента, позволяющий реализовать все возможные комбинации факторов

На пятом этапе для определения фактического времени эвакуации людей используется имитационное моделирование, реализуемое в программном обеспечении Anylogic. В рамках предлагаемой методики применяется агентно-ориентированный подход, так как он позволяет исследовать поведение децентрализованных агентов и то, как их поведение влияет на поведение системы в целом, что позволяет учесть контингент посетителей ночных клубов, их психофизиологические особенности.

Результаты имитационного моделирования используются для проведения полного факторного эксперимента в соответствии с планом проведения экспериментов, полученном на предыдущем этапе.

На шестом этапе проводится полный факторный эксперимент и строится модель управления эффективностью эвакуации.

Для начала рассчитываются средние выборочные результатов для каждого эксперимента по формуле:

$$\bar{Y}_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \tilde{Y}_{ij}, \quad j = \overline{1, n}, \quad (2)$$

где  $m$  – число повторений эксперимента,  $n$  – количество экспериментов,  $\tilde{Y}_{ij}$  – значение результата, полученного в  $i$ -ом опыте ( $i=1, \dots, m$ ) для  $j$ -ого эксперимента ( $j=1, \dots, n$ ).

Использованию в расчетах усредненных значений характерно наличие погрешности, которую можно оценить с помощью дисперсии. Она рассчитывается по формуле:

$$S^2\{\tilde{Y}_i\} = \frac{\sum_{j=1}^m (\tilde{Y}_{ij} - \bar{Y}_i)^2}{m-1}. \quad (3)$$

Проверка гипотезы об однородности дисперсии осуществляется при помощи критерия Кохрена. Расчетное значение критерия Кохрена определяется по формуле:

$$G_p = \frac{\max(S^2\{\bar{Y}_i\})}{\sum_{i=1}^n S^2\{\bar{Y}_i\}}. \quad (4)$$

Если  $G_p < G_T$ , то гипотеза об однородности дисперсии принимается.

Коэффициенты уравнения регрессии вычисляются с помощью метода наименьших квадратов по формулам:

$$a_0 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \bar{Y}_j, \quad (5)$$

$$a_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n Z_{ji} \bar{Y}_j, \quad j = \overline{1, n}.$$

Первым этапом оценки значимости рассчитанных коэффициентов многофакторной модели является определение дисперсии воспроизводимости с использованием формулы:

$$S_B^2 = \frac{\sum_{i=1}^n S^2\{\bar{Y}_i\}}{n}. \quad (6)$$

Далее вычисляется среднее квадратическое отклонение коэффициентов:

$$S\{a_k\} = \sqrt{\frac{S_B^2}{nm}}. \quad (7)$$

Проверка гипотезы о статистической значимости коэффициентов осуществляется с помощью критерия Стьюдента. Необходимо рассчитать критерий для каждого коэффициента следующим образом:

$$t_k = \frac{|a_k|}{S\{a_k\}}. \quad (8)$$

Если  $t_p > t_T$ , то гипотеза о статистической значимости коэффициента принимается.

Далее, с учетом значимых коэффициентов, строится уравнение регрессии в нормированных переменных вида:

$$\hat{Y} = a_0 + a_1 Z_1 + a_2 Z_2 + a_3 Z_3 \quad (9)$$

Его необходимо проверить на адекватность.

Проверка гипотезы об адекватности математической модели осуществляется с помощью критерия Фишера. Для определения его расчетного значения необходимо вычислить дисперсию адекватности.

Для этого находят значения изучаемого параметра по полученному уравнению регрессии (9).

Для оценки дисперсии адекватности используется выражение:

$$S_{ад}^2 = \frac{m}{n-l} \sum (\bar{Y}_i - \hat{Y}_i)^2, \quad (10)$$

где  $l$  – число значимых коэффициентов в математической модели.

Далее вычисляется расчетное значения критерия Фишера:

$$F_p = \frac{S_{ад}^2}{S_B^2}. \quad (11)$$

Если  $F_p < F_T$ , то гипотеза об адекватности математической модели принимается.

Уравнение регрессии в натуральных переменных получается путем подстановки вместо  $Z_i$  их выражения через  $X_i$ , обозначенных на четвертом этапе.

На седьмом этапе проводится формирование вариантов организационно-проектных решений. Подбираются такие значения управляемых параметров  $X_i$ , при которых обеспечивается не превышение времени эвакуации  $t_э$  над требуемым временем эвакуации  $t_{тр}$ .



Декомпозиция этапов методики позволила сформировать алгоритм интеллектуальной поддержки принятия организационно-проектных решений по управлению эффективностью эвакуации из учреждений клубного типа, которая включает в себя следующую единую последовательность шагов:

Шаг 1 – Разработка цифровой информационной модели (ВИМ-модели) исследуемого объекта.

Шаг 1.1 – Создание плана объекта в программном обеспечении Revit для ВИМ-проектирования.

Шаг 1.2 – Задание материалов отделки здания и их свойств в ВИМ-модели.

Шаг 2 – Оценка распространения ОФП на основе полевой модели в программном обеспечении Pyrosim.

Шаг 2.1 – Экспорт плана здания из программного обеспечения Revit в Pyrosim (в формате DWG).

Шаг 2.2 – Задание сценария пожара в Pyrosim.

Шаг 2.3 – Задание очага пожара и датчиков ОФП.

Шаг 2.4 – Исследование модели и фиксация результатов моделирования распространения ОФП, времени блокирования эвакуационных путей.

Шаг 2.5 – Определение необходимого (требуемого) времени эвакуации (путем умножения времени блокирования эвакуационных путей на коэффициент безопасности на 0,8).

Шаг 3 – Построение и исследование байесовской модели эвакуации в программном обеспечении GeNIe.

Шаг 3.1 – Задание узлов байесовской сети в виде факторов, оказывающих влияние на процесс эвакуации.

Шаг 3.2 – Определение количества состояний каждого узла.

Шаг 3.3 – Определение зависимостей между узлами байесовской сети.

Шаг 3.4 – Задание априорных вероятностей для корневых узлов байесовской сети и формирование таблиц условных вероятностей для остальных узлов.

Шаг 3.5 – Оценка величины воздействия факторов на время эвакуации.

Шаг 3.6 – Определение факторов, оказывающих наибольшее влияние на превышение фактического времени эвакуации над необходимым (требуемым).

Шаг 4 – Формирование плана проведения эксперимента.

Шаг 4.1 – Определение количества, верхнего и нижнего уровней рассматриваемых факторов  $X_i$ .

Шаг 4.2 – Нормировка факторов по формуле (1).

Шаг 4.3 – Выбор класса модели

Шаг 4.4 – Составление матрицы плана эксперимента.

Шаг 5 – Построение имитационной модели эвакуации в среде Anylogic.

Шаг 5.1 – Экспорт плана здания из программного обеспечения Revit в Anylogic (в формате DXF).

Шаг 5.2 – Задание характеристик и поведения агентов при эвакуации.

Шаг 5.3 – Формирование исходных данных модели в соответствии матрицей плана эксперимента.

Шаг 5.4 – Определение фактического времени эвакуации для каждого эксперимента из матрицы плана эксперимента.

Шаг 6 – Идентификация модели управления эффективностью эвакуации.

Шаг 6.1 – Расчет средних выборочных результатов для каждого эксперимента по формуле (2).

Шаг 6.2 – Расчет значения дисперсии для каждого эксперимента по формуле (3).

Шаг 6.3 – Проверка гипотезы об однородности дисперсии с использованием критерия Кохрена.

Шаг 6.3.1 – Нахождение расчетного значения критерия Кохрена по формуле (4).

Шаг 6.3.2 – Если  $G_p < G_T$ , то переход к шагу 6.4, иначе возврат к шагу 4.4.

Шаг 6.4 – Вычисление коэффициентов уравнения регрессии по формуле (5).

Шаг 6.5 – Вычисление дисперсии воспроизводимости по формуле (6).

Шаг 6.6 – Вычисление среднего квадратического отклонения коэффициентов по формуле (7).

Шаг 6.7 – Проверка гипотезы о статистической значимости коэффициентов модели с использованием критерия Стьюдента.

Шаг 6.7.1 – Нахождение расчетного значения критерия Стьюдента для каждого коэффициента по формуле (8).

Шаг 6.7.2 – Если  $t_p > t_T$ , то переход к шагу 6.8, иначе возврат к шагу 4.

Шаг 6.8 – Построение уравнения регрессии в нормированных переменных вида (9).

Шаг 6.9 – Проверка гипотезы об адекватности математической модели с использованием критерия Фишера.

Шаг 6.9.1 – Расчет дисперсии адекватности по формуле (10).

Шаг 6.9.2 – Нахождение расчетного значения критерия Фишера по формуле (11).

Шаг 6.9.3 – Если  $F_p < F_T$ , то переход к шагу 6.10, иначе возврат к шагу 4.3.

Шаг 6.10 – Преобразование нормированных переменных в натуральные в полученном уравнении регрессии, формирование модели управления эффективностью эвакуации.

Шаг 7 – Формирование вариантов организационно-проектных решений, обеспечивающих  $t_э < t_{тр}$ .

Схема алгоритма интеллектуальной поддержки принятия организационно-проектных решений по управлению эффективностью эвакуации из учреждений клубного типа представлена на Рис. 2.

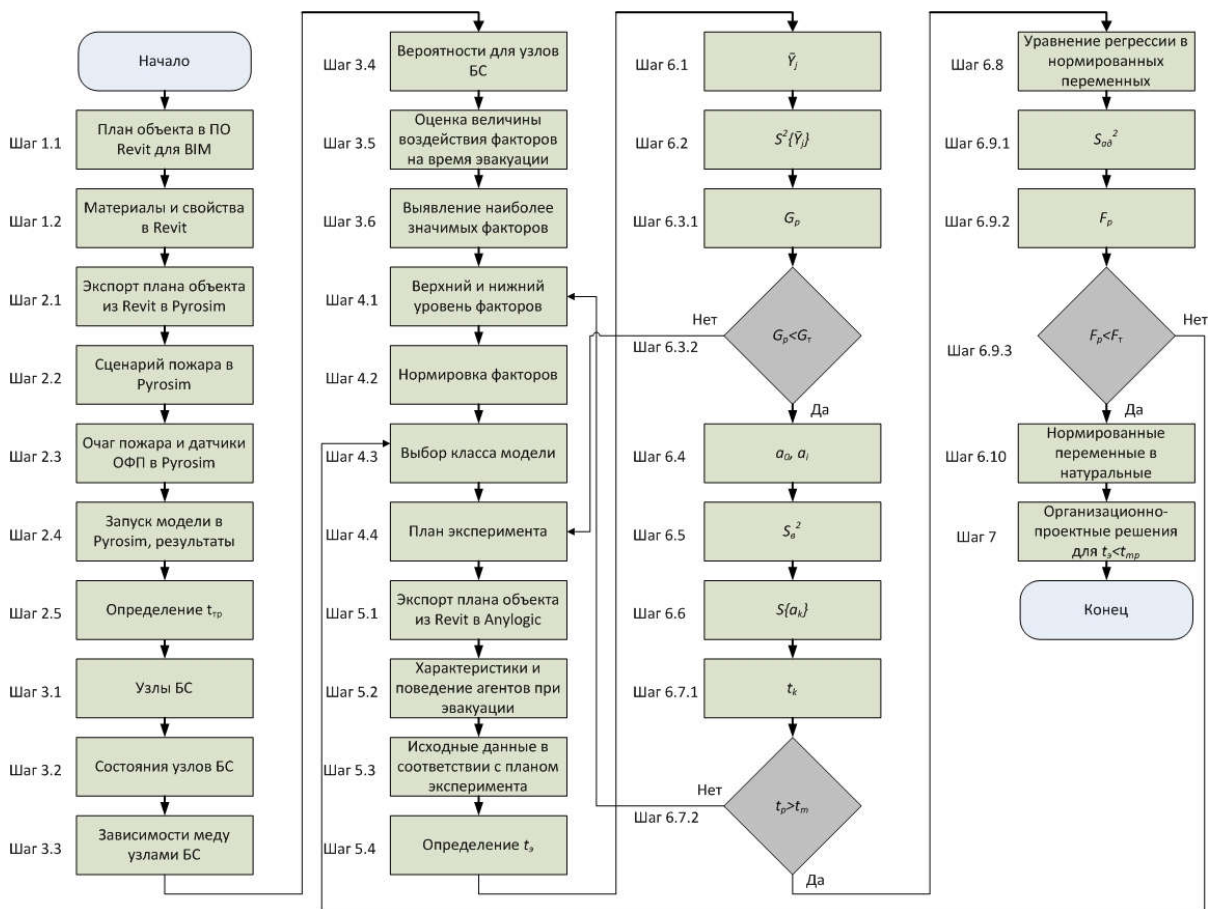


Рис. 2. Алгоритм интеллектуальной поддержки принятия организационно-проектных решений по управлению эффективностью эвакуации из учреждений клубного типа

## Заключение

Принятие эффективных конструктивных, объемно-планировочных и инженерно-технических решений является важным аспектом обеспечения безопасности людей в ночных клубах, ресторанах, барах в случае пожаров [22].

Представленная в статье методика и реализующий ее алгоритм интеллектуальной поддержки принятия организационно-проектных решений по управлению эффективностью эвакуации из учреждений клубного типа позволяет обосновывать управленческие решения по обеспечению требуемого времени эвакуации в случае пожара.

Значимость представленных результатов заключается в развитии научно-методического аппарата оценки эффективности эвакуации людей при пожарах в учреждениях клубного типа, реализованным инновационным подходом к формированию аналитической закономерности зависимости времени эвакуации от возможных организационно-проектных решений.

Предлагаемые алгоритмические средства могут быть применены для управления пожарным риском в целом, что является весьма актуальным и важным вопросом обеспечения безопасности людей в ночных клубах. Также необходимо отметить, что предлагаемый подход не ограничивается возможностью применения исключительно для учреждений клубного типа, при определенной адаптации может использоваться и для других объектов с массовым пребыванием людей.

## Список источников

1. Sharma S. et al. Collaborative virtual reality environment for a real-time emergency evacuation of a nightclub disaster // *Electronic Imaging*. – 2019. – Vol. 2019. – No. 2. – P. 181-1-181-10. DOI <https://doi.org/10.2352/ISSN.2470-1173.2019.2.ERVR-181>.
2. Hennemann G. G. et al. Investigation on the causes and consequences of Kiss nightclub fire in Brazil // *Architecture, Structures and Construction*. – 2022. – Vol. 2. – No. 2. – P. 291-309. – DOI <https://doi.org/10.1007/s44150-022-00032-1>
3. Gragnani A. et al. Response and legislative changes after the Kiss nightclub tragedy in Santa Maria/RS/Brazil: Learning from a large-scale burn disaster // *Burns*. – 2017. – Vol. 43. – No. 2. – P. 343-349. DOI <https://doi.org/10.1016/j.burns.2016.08.010>
4. Harrington D. T., Biffi W. L., Cioffi W. G. The station nightclub fire // *The Journal of burn care & rehabilitation*. – 2005. – Vol. 26. – No. 2. – P. 141-143. – DOI <https://doi.org/10.1097/01.BCR.0000155537.60909.FC>
5. Задурова А.А. Матвеев А.В. Смирнов А.С. Анализ пожаров на объектах с массовым пребыванием людей на примере ночных клубов // *Научно-аналитический журнал Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России*. – 2020. – № 1. – С. 20-28. EDN RHQLEI.
6. Исаков Г.Н. Анализ и моделирование последствий при неуправляемой эвакуации людей в условиях пожара // *Север России: стратегии и перспективы развития: материалы II Всероссийской научно-практической конференции, Сургут, 27 мая 2016 года. Том 2.* – Сургут: Сургутский государственный университет, 2016. – С. 264-267. – EDN ZAJVBD.
7. Chen Y. J., Lai Y. S., Lin Y. H. BIM-based augmented reality inspection and maintenance of fire safety equipment // *Automation in Construction*. – 2020. – Vol. 110. – P. 103041. – DOI <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.103041>
8. Актерский Ю.Е. и др. BIM-модель как инструмент снижения пожарной опасности объектов с массовым пребыванием людей // *Пожарная безопасность объектов капитального строительства. Нормативы, проектирование, устройство и эксплуатация: Материалы научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 25 марта 2021 года.* – СПб: Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2021. – С. 36-42.
9. Пузач С.В. Методы расчета теплообмена при пожаре в помещении и их применение при решении практических задач пожароразрывобезопасности. – М.: Акад. ГПС МЧС России, 2005.
10. Применение полевого метода математического моделирования пожаров в помещениях: метод. рекомендации. – М.: ВНИИПО МЧС России, 2003. – 35 с.

11. Джафарова А.А. Оценка распространения опасных факторов пожара в ночном клубе // Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты). – 2023. – № 1(45). – С. 7-14..
12. Звягин Л.С. Метод байесовских сетей и ключевые аспекты байесовского моделирования // Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям. – 2019. – Т. 1. – С. 30-34. EDN VYDMBX.
13. Задурова А.А. Моделирование эвакуации при пожаре в ночном клубе на основе байесовской сети // Научно-аналитический журнал "Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России". – 2022. – № 2. – С. 154-162.
14. Бутырский Е.Ю., Матвеев А.В. Математическое моделирование систем и процессов. – СПб: Информационный издательский учебно-научный центр "Стратегия будущего", 2022. – 733 с. – ISBN 978-5-4268-0064-9. – DOI 10.37468/book\_011222.
15. Коткова Е.А., Матвеев А.В., Нефедьев С.А., Таранцев А.А. Агентное моделирование процесса эвакуации людей при пожарах в зданиях: обзор подходов и исследований // Современные наукоемкие технологии. – 2023. – № 10. – С. 55-62. DOI 10.17513/snt.39791..
16. Matveev A.V., Maximov A.V., Zadurova A.A. Simulation model of emergency evacuation in case of fire in a nightclub // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2021. – Vol. 720. – No. 1. – P. 012019. – DOI 10.1088/1755-1315/720/1/012019.
17. Матвеев А.В. Методы моделирования и прогнозирования. – СПб: Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2022. – 230 с. – ISBN 978-5-907116-73-3.
18. Бойко А.Ф., Воронкова М.Н. Теория планирования многофакторных экспериментов: учебное пособие. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, ЭБС АСВ, 2020. – 75 с.
19. Массель Л. В., Пяткова Е. В. Применение байесовских сетей доверия для интеллектуальной поддержки исследований проблем энергетической безопасности // iPolytech Journal. – 2012. – № 2 (61). – С. 8-13.
20. Дорожко И. В., Иванов О. А. Модель системы поддержки принятия решений для диагностирования бортовых систем космического аппарата на основе байесовских сетей // Труды МАИ. – 2021. – № 118. – С. 19. – DOI 10.34759/trd-2021-118-19.
21. Приказ МЧС РФ от 14 ноября 2022 г. N 1140 «Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности».
22. Пузач С.В. Смагин А.В., Доан Вьет Мань К вопросу обеспечения безопасности людей при возникновении пожаров в ресторанах, барах и ночных клубах // Наркология. – 2009. – Т. 8, № 10(94). – С. 93-96.

## References

1. Sharma S. et al. Collaborative virtual reality environment for a real-time emergency evacuation of a nightclub disaster // Electronic Imaging. – 2019. – Vol. 2019. – No. 2. – P. 181-1-181-10. DOI <https://doi.org/10.2352/ISSN.2470-1173.2019.2.ERVR-181>.
2. Hennemann G. G. et al. Investigation on the causes and consequences of Kiss nightclub fire in Brazil // Architecture, Structures and Construction. – 2022. – Vol. 2. – No. 2. – P. 291-309. – DOI <https://doi.org/10.1007/s44150-022-00032-1>
3. Gragnani A. et al. Response and legislative changes after the Kiss nightclub tragedy in Santa Maria/RS/Brazil: Learning from a large-scale burn disaster // Burns. – 2017. – Vol. 43. – No. 2. – P. 343-349. DOI <https://doi.org/10.1016/j.burns.2016.08.010>
4. Harrington D. T., Biffi W. L., Cioffi W. G. The station nightclub fire // The Journal of burn care & rehabilitation. – 2005. – Vol. 26. – No. 2. – P. 141-143. – DOI <https://doi.org/10.1097/01.BCR.0000155537.60909.FC>
5. Zadurova A.A. Matveev A.V. Smirnov A.S. Analysis of fires at facilities with mass stay of people on the example of night clubs // Scientific and analytical journal Vestnik of St. Petersburg University of the State Fire Fighting Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia. - 2020. - No 1. - P. 20-28.

6. Isakov G.N. Analysis and modelling of consequences in case of uncontrolled evacuation of people in fire conditions // North of Russia: strategies and prospects of development: proceedings of the II All-Russian scientific-practical conference, Surgut, 27 May 2016. Volume 2. - Surgut: Surgut State University, 2016. - P. 264-267.
7. Chen Y. J., Lai Y. S., Lin Y. H. BIM-based augmented reality inspection and maintenance of fire safety equipment // Automation in Construction. – 2020. – Vol. 110. – P. 103041. – DOI <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.103041>
8. Aktersky Yu.E. et al. BIM-model as a tool to reduce the fire hazard of objects with mass stay of people // Fire safety of capital construction objects. Regulations, design, construction and operation: Proceedings of the scientific and technical conference, St. Petersburg, 25 March 2021. - St. Petersburg: St. Petersburg University of State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2021. - P. 36-42.
9. Puzach S.V. Calculation methods of heat and mass transfer at fire in a room and their application in solving practical problems of fire and explosion safety. - Moscow: Acad. GPS MES of Russia, 2005.
10. Application of the field method of mathematical modelling of fires in premises: methodical recommendations. - Moscow: VNIPO MES of Russia, 2003. - 35 c.
11. Dzhaferova A.A. Assessment of the spread of dangerous factors of fire in a nightclub // Natural and technogenic risks (physical, mathematical and applied aspects). - 2023. - No 1(45). - P. 7-14. - EDN MZFGIA.
12. Zvyagin L.S. Bayesian networks method and key aspects of Bayesian modelling // International Conference on Soft Computing and Measurement. - 2019. - Vol. 1. - P. 30-34.
13. Zadurova A.A. Modelling of evacuation at a fire in a nightclub on the basis of a Bayesian network // Scientific and analytical journal "Bulletin of St. Petersburg University of the State Fire Fighting Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia". - 2022. - No 2. - P. 154-162. - EDN MVPNKV.
14. Butyrskiy E.Yu., Matveev A.V. Mathematical modelling of systems and processes. - SPb: Information publishing educational and research centre "Strategy of the Future", 2022. - 733 p. - ISBN 978-5-4268-0064-9. - DOI 10.37468/book\_011222. - EDN CCRIRT.
15. Kotkova E.A., Matveev A.V., Nefediev S.A., Tarantsev A.A. Agent-based modelling of the process of evacuation of people at fires in buildings: a review of approaches and studies // Modern knowledge-intensive technologies. - 2023. - No 10. - P. 55-62. DOI 10.17513/snt.39791.
16. Matveev A.V., Maximov A.V., Zadurova A.A. Simulation model of emergency evacuation in case of fire in a nightclub // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2021. – Vol. 720. – No. 1. – P. 012019. – DOI 10.1088/1755-1315/720/1/012019.
17. Matveev A.V. Methods of modelling and forecasting. - St. Petersburg: St. Petersburg University GPS MES of Russia, 2022. - 230 p. - ISBN 978-5-907116-73-3. - EDN IMLKWS.
18. Boiko A.F., Voronkova M.N. Theory of planning multifactorial experiments: textbook. - Belgorod: Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. V.G. Shukhov, EBS ASV, 2020. - 75 p.
19. Massel L. V., Pyatkova E. V. Application of Bayesian trust networks for intellectual support of energy security research // iPolytech Journal. - 2012. - No. 2 (61). - P. 8-13. - EDN OXGSLR.
20. Dorozhko I. V., Ivanov O. A. Model of the decision support system for diagnostics of the spacecraft onboard systems on the basis of Bayesian networks // Proceedings of MAI. - 2021. - No. 118. - P. 19. - DOI 10.34759/trd-2021-118-19.
21. Order of the Ministry of Emergency Situations of the Russian Federation from 14 November 2022 N 1140 "On approval of the methodology for determining the estimated values of fire risk in buildings, structures and constructions of different classes of functional fire hazard".
22. Puzach S.V. Smagin A.V., Doan Viet Manh To the issue of ensuring the safety of people in case of fires in restaurants, bars and nightclubs // Narcology. - 2009. - Vol. 8, No 10(94). - P. 93-96.

Информация об авторах

А.В. Матвеев - кандидат технических наук, доцент

Information about the author

A.V. Matveev - Ph.D. of Engineering Sciences, Associate Professor

**Вклад авторов:** все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Contribution of the authors:** the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 14.01.2024; одобрена после рецензирования 01.02.2024; принята к публикации 21.03.2024.

The article was submitted 14.01.2024, approved after reviewing 01.02.2024, accepted for publication 21.03.2024.